文章编号:1000-4939(2023)03-0604-07

多壁碳纳米管/天然橡胶复合材料的大应变传感特性研究

姚铮,杨洋,郭荣鑫,刘兴姚,刘荟

(昆明理工大学建筑工程学院,云南省土木工程防灾重点实验室,650500 昆明)

摘　要:制备了一种多壁碳纳米管改性天然橡胶复合材料,制备过程中通过加入表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)改善碳纳米管在橡胶基体中的分散性能,降低了碳纳米管含量的渗流阈值,更有效地构建导电网络。通过实验研究发现复合材料的拉伸强度和刚度随碳纳米管含量增加而上升;材料的电阻/应变敏感因子在碳纳米管含量4%时最高;材料在循环载荷作用下,电阻和应变保持同步变化,并在一定循环次数后达到稳定,表现出高灵敏、高稳定的响应特性,证明该复合材料适用于大变形构建的应变监测与传感。

关键词:电阻/应变响应;橡胶基复合材料;碳纳米管;表面活性剂;大变形监测

中图分类号:O39　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.03.012

Large-strain sensing characteristics of multi-walled carbon nanotube/natural rubber composites

YAO Zheng,YANG Yang,GUO Rongxin,LIU Xingyao,LIU Hui

(School of Construction Engineering,Kunming University of Technology,
Yunnan Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention,650500 Kunming,China)

Abstract:In this study,a multi-walled carbon nanotube-modified natural rubber composite was prepared. The preparation process improved the dispersion performance of carbon nanotubes in the rubber matrix by adding the surfactant cetyltrimethylammonium bromide (CTAB),which reduced the percolation threshold of carbon nanotube content and built the conductive network more effectively. The tensile strength and stiffness of the composites were found to increase with the increase of carbon nanotube content through experimental studies; the resistance/strain sensitivity factor of the material was highest at 4% of carbon nanotube content; the resistance and strain of the material maintained synchronous changes under cyclic loading and reached stability after a certain number of cycles,showing highly sensitive and stable response characteristics,proving that the composites are suitable for strain of large deformation construction. It is proved that the composite material is suitable for strain monitoring and sensing of large deformation construction.

收稿日期:2021-06-21　　**修回日期**:2022-10-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11962009);昆明理工大学分析测试基金资助项目(No. 2019M20182110015)
通信作者:杨洋,教授。E-mail:yangyang0416@kmust.edu.cn
引用格式:姚铮,杨洋,郭荣鑫,等. 多壁碳纳米管/天然橡胶复合材料的大应变传感特性研究[J]. 应用力学学报,2023,40(3):604-610.
YAO Zheng,YANG Yang,GUO Rongxin,et al. Large-strain sensing characteristics of multi-walled carbon nanotube/natural rubber composites [J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(3):604-610.

Key words: resistance/strain response; rubber matrix composites; carbon nanotube; surfactant; large deformation monitoring

减隔震技术和隔震支座的运用,是目前最为有效的抗震措施[1-2]。然而,地处我国西部的云南、四川、青海等省地震频发,烈度高,破坏力强,隔震支座工作负荷较高,破损严重。再加上隔震支座内部的橡胶材料老化与失效加速支座的破坏与失效[3-5]。因此,高烈度地震区隔震支座的服役性能监测至关重要。然而在服役中的支座拆装困难,检测成本高[6]。如果能够在服役状态下实现隔震支座应变与载荷的实时监测,就可及时评估支座破损程度和使用寿命,实现对工程结构安全状况的综合分析与预警。部分学者通过对现有传感器和支座的结构改装,在一定程度上实现了支座性能实时监测。FENG 等[7]将压电传感器分别埋入隔震支座上下钢板内,通过两组传感器信号的同步性判断支座破损已否,该装置虽然实现了对支座的实时监测,但结构复杂且只能判断失效已否,不能实时定量监测应力应变的变化规律。SUN 等[8]将微机电压力传感器埋入到支座橡胶层与钢板之间,同样实现了支座应力实时监测,但微机电系统结构复杂、设计成本高,一旦损坏则维修困难。目前为止,还未见稳定、精确、可靠的橡胶支座实时监测技术在工程中应用。

传统结构健康监测传感材料以无机非金属为主,包括光纤光栅、压电陶瓷、水泥基压敏材料等,其变形能力、抗破坏能力和耐久性不足,无法监测隔振支座等大变形构件的变形和损伤[9-10]。因此具有大变形能力的应变传感器是目前结构健康监测领域的一个缺口。自碳纳米管和石墨烯等纳米碳材料相继问世以来,其良好的化学和物理性能受到不同领域学者的广泛关注[11-13]。纳米碳改性橡胶基复合材料兼备了橡胶的超弹性、大变形以及纳米碳材料优良的导电和力学性能,特别是该类材料的电阻/应变响应效应,具有广阔的工程应用前景和科学价值,成为近年来智能复合材料与传感器领域的研究热点[11-17]。

目前针对纳米碳改性橡胶基智能复合材料的研究主要集中在生物医学领域[14-17],在土木工程领域还鲜有报道。主要是因为纳米碳材料价格昂贵,且在橡胶基体中难以分散,进一步提高了复合材料制备成本,降低了材料传感信号的稳定性。这也成为了制约此类复合材料工程应用的主要问题,很多学者对此开展了相关研究。葛怡等[18]发现表面活性剂 FC-134 可促进碳纳米管在天然橡胶基体中的分散,制备的复合材料性能稳定。宋君萍等[19]发现十二烷基苯磺酸钠可有效阻止碳纳米管在橡胶基体间的团聚,并制备了碳纳米管/炭黑复合改性橡胶复合材料,比纯橡胶基体的断裂伸长率提高了 66.1%,导热率提高了 8.4%。上述研究证明表面活性剂可在一定程度上促进碳纳米管在橡胶基体中的分散。

本研究采用十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)为分散剂,制备碳纳米管/天然橡胶复合材料,并对材料的力学性能和电阻/应变响应性能进行测试,并结合微观形貌表征,分析 CTAB 和碳纳米管用量对复合材料的智能响应性能的影响规律,优化制备工艺,为复合材料在大变形监测传感领域的应用提供理论支撑。

1　实　验

1.1　实验材料

多壁碳纳米管(MWCNT)长度 10～20 μm,外径 4～6 nm,比表面积 500～700 m^2/g,纯度≥98%,产自中国成都有机化学股份有限公司。十六烷基三甲基溴化铵(CTAB),产自中国天津市光复精细化工研究所。天然橡胶(NR),产自山东富舜新材料科技有限公司。硫化剂过氧化二异丙苯(DCP),产自青岛荣基新材料有限公司。

1.2　碳纳米管天然橡胶复合材料的制备

采用溶液法制备多壁碳纳米管天然橡胶复合材料,其制备工艺如下:将表面活性剂 CTAB 溶于去离子水中,搅拌至完全溶解;然后加入相同质量的 MWCNT,超声搅拌 120 min,得到稳定的碳纳米管分散液。将天然橡胶乳液添加到碳纳米管分散液中,超声搅拌 60 min,得到分散均匀的混合悬浮液,随后在 60 ℃的条件下向混合悬浮液中加入硫化剂 DCP,搅拌 10 min 直至完全溶解。将该混合悬浮液放入真空干燥箱中,除去溶剂至恒重,所得的固体混合再 160 ℃硫化 10 min,得到碳纳米管/天然橡胶复合材料样品,表 1 为实验配方。

表 1 实验配方

Tab. 1 Chemical composition of cement

材料	质量百分比/%
NR	100
DCP	2
MWCNT	变量 X ($X=0,1,2,3,4,5,6$)
CTAB	变量 Y ($Y=2X$)

1.3 测试与表征

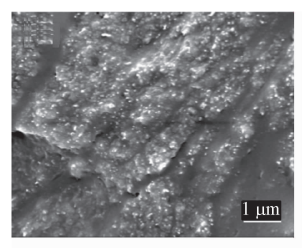
采用日本电子扫描电镜 JSM-7800F 对复合材料的微观形貌进行表征。采用德国布鲁克(Bruker)ALPHA 傅里叶变换红外光谱仪,波数范围 4 000 ~ 400 $\mathrm{cm^{-1}}$,扫描次数 16 次,光谱分辨率 4 $\mathrm{cm^{-1}}$,对样品进行 FT-IR 分析;采用中国长春试验机研究所有限公司电子万能试验机(DDL10)对碳纳米复合材料进行力学性能测试,测试方法按 GB/T 528 -2009 执行;采用数字万用表(Agilent 34401A,美国)和中国深圳市宏盛电子有限公司 DPS-305CF 型直流稳压电源对材料的导电性能和电阻/应变响应性能进行测试。

2 结果与讨论

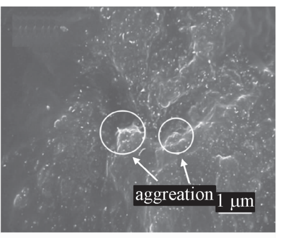
2.1 复合材料微观结构和成分

2.1.1 SEM 微观形貌分析

图 1 所示为 MWCNT 改性天然橡胶的 SEM 图, MWCNT 含量为 4%。其中,图 1(a)为加入 CTAB 的试样,图 1(b)为未加 CTAB 的试样。图 1(b)图中有明显的碳纳米管团聚现象,图 1(a)图中的多壁碳纳米管分散较为均匀,说明 CTAB 的加入,使碳纳米管的分散效果明显改善。



(a) CTAB表面活性剂改性



(b) 未掺表面活性剂

图 1 复合材料 SEM 图像

Fig. 1 SEM images of the specimens

2.1.2 FT-IR 光谱分析

图 2 所示为 CTAB 改性下,多壁碳纳米管含量为 4%、5% 和 6% 的天然橡胶复合材料 FT-IR 谱图。图中,波数为3 362 $\mathrm{cm^{-1}}$峰为羟基-OH 伸缩振动峰,3 030 $\mathrm{cm^{-1}}$峰为天然橡胶中 =C-H 键伸缩振动峰,2 960 $\mathrm{cm^{-1}}$峰为甲基中 C-H 键伸缩振动峰,2 916、2 852 $\mathrm{cm^{-1}}$峰分别归属于甲基或亚甲基中 C-H 键反对称伸缩振动与对称伸缩振动峰,1 657 $\mathrm{cm^{-1}}$峰为 C=C键伸缩振动峰,1 447、1 373 $\mathrm{cm^{-1}}$峰为饱和烃基中 C-H 键弯曲振动峰,1 245 $\mathrm{cm^{-1}}$峰为 CTAB 分子中 C-N 键伸缩振动峰,1 092 $\mathrm{cm^{-1}}$峰为 C-O-C 基团伸缩振动峰,833 $\mathrm{cm^{-1}}$峰为天然橡胶中 =C-H 键面外弯曲振动。图中,随着多壁碳纳米管含量增加,各试样的峰值增强,说明碳纳米管促进了红外光波能量的吸收。

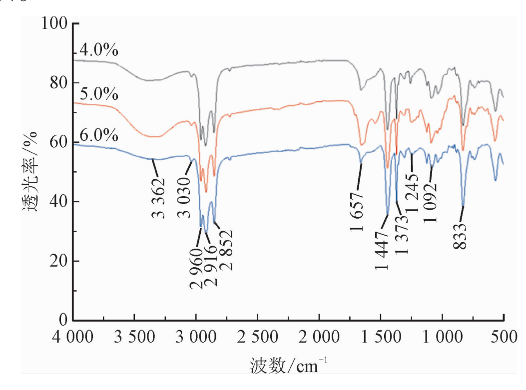


图 2 CTAB 表面活性剂改性下复合材料的复合材料的 FT-IR 光谱

Fig. 2 FT-IR spectra of composites modified by CTAB surfactant

2.2 MWCNT/NR 复合材料导电性能

根据隧道效应原理,当基体中碳纳米管含量达到一定阈值,并且分散均匀时,碳纳米管分子之间虽不接触但距离足够小,满足隧道效应条件,电子可在相邻碳纳米管分子之间形成隧穿电流,实现导电。材料的电导率和 MWCNT 含量间存在如下解析关系[20]。

$$\sigma = \sigma_0 (\varphi - \varphi_c)^t \tag{1}$$

式中:σ 为复合材料的体积导电率;σ_0 为比例因子;φ 为 MWCNT 的质量含量;φ_c 为 MWCNT 含量的导电渗流阈值;t 为隧道效应指数。

表面活性剂与导电填料的比例十分重要,表面活性剂分子吸附在 MWCNT 的表面,防止 MWCNT 的吸附和团聚,使其稳定分散与基体中。但过多的表面活性剂会在基体中产生结晶,导致复合材料导电性能下降,同时还会在胶乳中产生气泡,影响材料密实度,导致力学性能下降[21],因而确定不同表面

活性剂与 MWCNT 最佳的比率是制备性能优异的复合材料的关键。图 3 所示为 MWCNT 含量为 6% 的试样，在不同 CTAB 含量下的电阻率。由图可见，MWCNT 与 CTAB 含量比率为 1∶2时，电阻率最低。当 CTAB 与 MWCNT 比例大于 1∶2后材料的电阻率成增大趋势，这说明 CTAB 吸附于 MWCNT 表面，制约了 MWCNT 的隧道导电能力。因此本实验中选取 MWCNT 与 CTAB 含量比为 1∶2。

图 4(a)所示为复合材料电导率与碳纳米管含量关系。由图可见随着碳纳米管含量增加，电导率保持上升趋势。对于加入 CTAB 的试样，MWCNT 含量在大约 1.5% 时，电导率明显上升，材料由绝缘体转变为导体。而未加 CTAB 的试样，MWCNT 含量超过约 3% 时，才出现电导率的上升现象。为进一步求出两种试样的导电渗流阈值 φ_c，图 4(b)列出了电导率 σ 与 MWCNT 超出阈值含量 $\varphi - \varphi_c$ 之间的对数关系式。二者之间程线性关系，由此可以推算出加入 CTAB 试样的渗流阈值 φ_c 为 1.32%，未加 CTAB 试样的阈值为 3.52%，前者比后者降低近 62.5%。主要原因是由于 CTAB 的加入，使 MWCNT 分散均匀，浓度较低时即可形成稳定导电网络。根据隧道效应原理[22]，当 MWCNT 含量超过 φ_c 之后，由于稳定的导电网络已形成，MWCNT 含量增加不再影响导电网络的结构，因此材料导电能力趋于平稳，不再随 MWCNT 含量增加而变化。

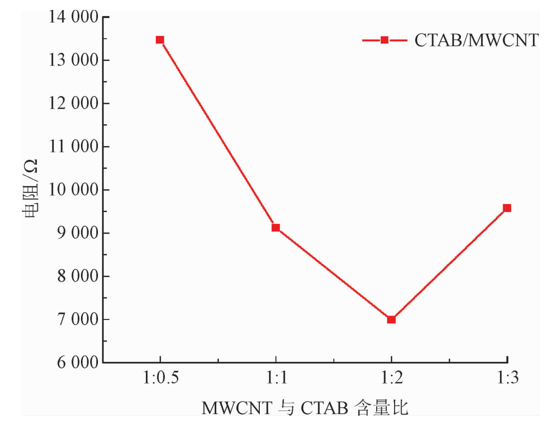
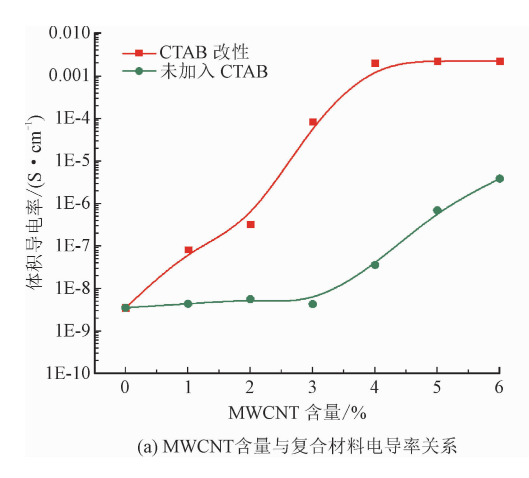
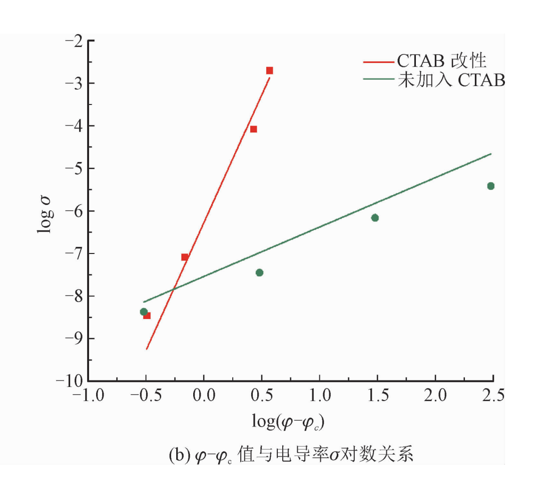


图 3　不同比率表面活性剂改性下复合材料导电性能

Fig. 3　Electrical conductivity of composites modified by surfactants with different ratios



(a) MWCNT含量与复合材料电导率关系



(b) $\varphi-\varphi_c$ 值与电导率σ对数关系

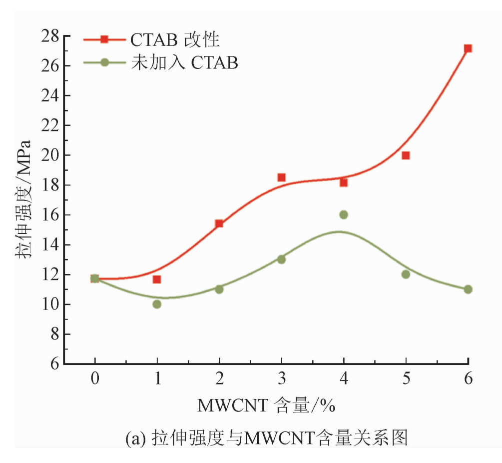
图 4　复合材料导电性能和 MWCNT 含量关系

Fig. 4　Conductivity of specimen via MWCNT content

2.3　CTAB 改性 MWCNT/NR 复合材料力学性能

图 5(a)所示为 CTAB 改性复合材料以及未改性材料的拉伸强度与 MWCNT 含量关系。由图可见，CTAB 改性材料的拉伸强度随 MWCNT 掺量的增大而增加，当 MWCNT 含量达 6.0% 时，材料拉伸强度比纯橡胶材料提升了 131.5%，而未改性材料的力学性能在 MWCNT 含量超过 4% 后开始下降，主要是 MWCNT 的团聚造成橡胶基体内部缺陷，影响了力学性能。图 5(b)列出了复合材料的拉断伸长率与 MWCNT 含量关系。由图可见，无论 CTAB 改性与否，材料拉断伸长率随 MWCNT 含量增加而逐渐降低，当 MWCNT 含量超 6.0%，材料拉断伸长率从 527% 下降到 422%。这是因为 MWCNT 分子与橡胶分子在网络中发生了物理缠结，增加了分子网络交联程度，致使材料刚度提升[23]。而未改性材料的拉断伸长率要低于改性材料，说明无 CTAB 时，MWCNT 团聚造成的橡胶基体缺陷使材料无法承受较高的应变载荷。同时，由图 2 所示 FT-IR 谱图可看出，随着 CTAB 含量增大，1 245 cm^{-1}处 C-N 键峰强度减弱，这说明 CTAB 中部分 N^- 与复合材料中物质形成氢键，从而 C-N 键极性较小，使得复合材料中键的

结合更加紧密,导致力学性能增强[24]。由此可见,分散良好的 MWCNT 即改善了材料的导电性能,同时也提升了材料的力学性能。



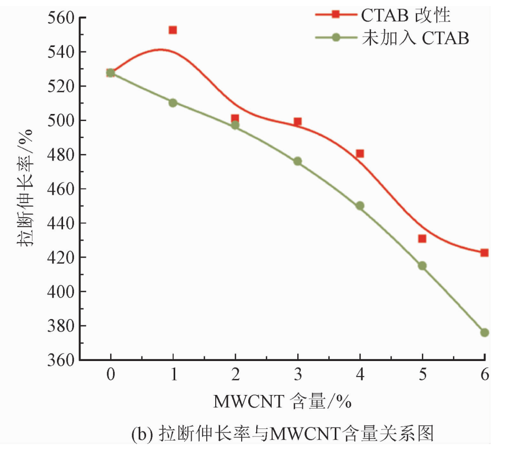


图 5 MWCNT 含量与复合材料力学性能关系

Fig. 5 The mechanical performance of specimen with different MWCNT content

2.4 MWCNT/NR 复合材料电阻/应变响应性能

图 6 为 CTAB 辅助分散条件下,不同 MWCNT 含量对复合材料的拉伸应变和电阻变化关系图。复合材料的电阻变化可用 $\Delta R/R_0$ 值表征,R_0 为初始电阻,ΔR 为电阻改变量。

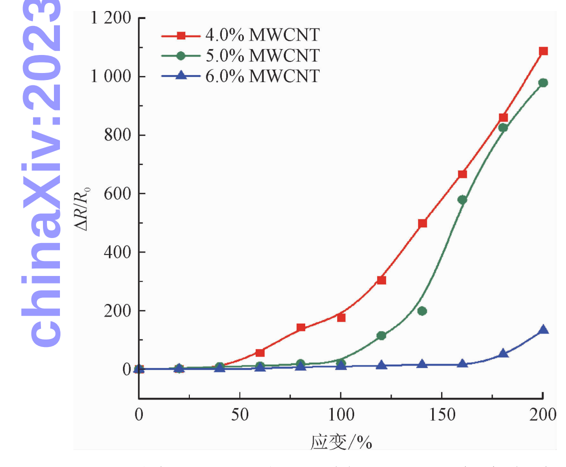


图 6 不同 MWCNT 含量试样的 $\Delta R/R_0$ 与应变关系

Fig. 6 $\Delta R/R_0$ via strain for the specimens with different MWCNT content

图 6 列出了 MWCNT 含量为 4.0%、5.0% 和 6.0% 时的实验结果。由图可见,当 MWCNT 含量为 4.0% 时,复合材料 $\Delta R/R_0$ 值随应变增加改变最明显,MWCNT 含量 6.0% 时,复合材料的电阻几乎不随应变改变。分析原因,可认为当 MWCNT 浓度较低但高于导电渗流阈值时,橡胶基体内部形成了密度相对较低的导电网络。根据隧道效应原理,该网络中的交联点和隧穿点总数少,基体应变增加时,交联点和隧穿点数目进一步减少,导致电阻增加,电阻对变形的敏感度较高。当 MWCNT 质量浓度较大时,导电网络密度大,交联点和隧穿点数数量大。当基体变形时交联点和隧穿点数目虽有改变,但总数变化不如 MWCNT 含量较低时明显,所以电阻改变量也较低。因此,当 MWCNT 含量高于渗流阈值时,复合材料的电阻/应变效应灵敏度随 MWCNT 含量增加而降低。

为进一步分析复合材料的应变监测性能,本研究在动态循环应变作用下,测试了材料的电阻/应变响应性能。图 7 所示为 MWCNT 含量为 4.0% 时,材料在 100 mm/min 加载和卸载速率以及 100% 应变幅值下的电阻/应变响应关系。其中,图 7(a)为材料在承受 100 次循环载荷过程中的响应,图 7(b)则分别列出了图 7(a)中 0 ~ 20 次循环、40 ~ 60 次循环和 80 ~ 100 次循环的局部放大图。根据图 7 中的实验结果,首先可以确定材料的电阻和应变保持同步变化。电阻的变化幅值在循环刚开始时不稳定,随着循环次数增加而降低。当循环超过 20 次时,电阻的变化幅值趋于稳定。具体原因是由于在循环刚开始时,材料内部的导电网络结构尚未稳定,随着应变的加载和卸载,网络结构发生同步破坏和重构,但每一次重构无法完全恢复初始状态,从而导致电阻在每一次循环后都较前一次有所降低。然而,当循环超过一定次数,网络结构趋于稳定,每次重构都可以恢复本次循环前的状态,材料导电能力不在受网络重构不完整的影响,电阻保持稳定,并与应变同步变化[25-26]。由此可见,该材料展现出令人满意的电阻/应变响应灵敏度和稳定性,对于大变形材料的应变监测传感较为适用。

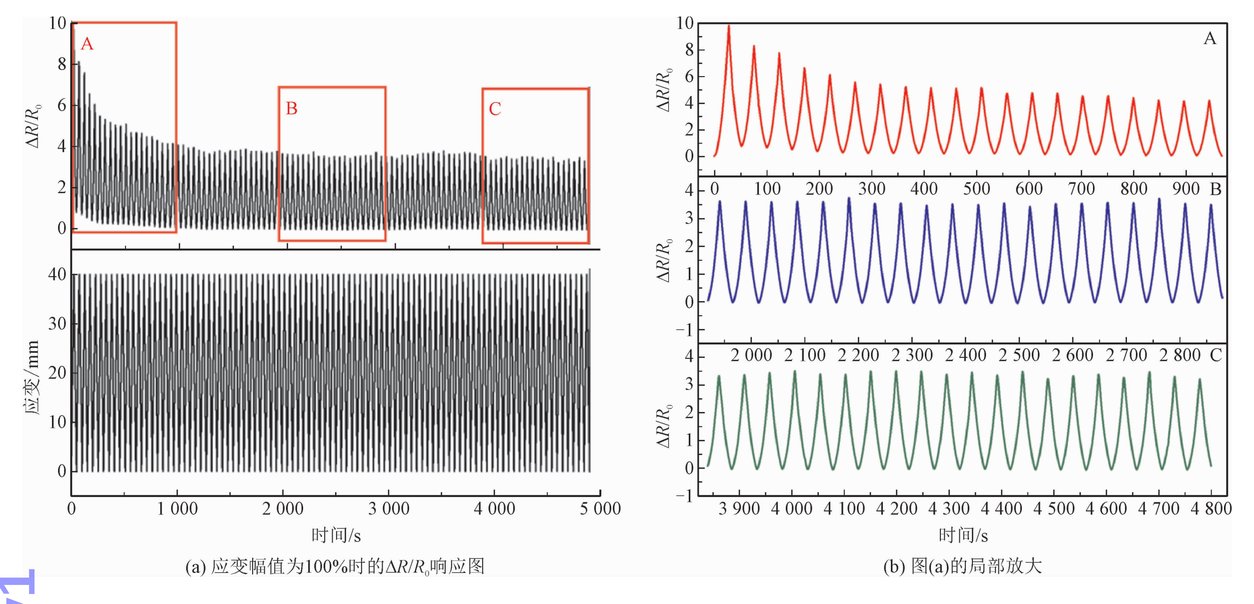


图 7　循环应变作用下的电阻/应变响应

Fig. 7　The resistance/strain response under cycle load

3　结　论

本研究制备了一种具有电阻/应变响应性能的多壁碳纳米管/天然橡胶复合材料，通过静态拉伸和循环载荷实验，分析了材料的电阻/应变响应的灵敏度和稳定性，得到以下结论。

1）在制备过程中通过加入表面活性剂 CTAB，使碳纳米管在橡胶基体中的分散性能得到明显提高，经 CTAB 改性的复合材料导电渗流阈值比未经改性的材料降低 62.5%。

2）碳纳米管具有增强材料力学性能的作用。随着碳纳米管含量增加，复合材料的拉伸强度和刚度提高显著提高，材料的刚破坏能力得到改善。

3）在渗流阈值以上，复合材料的电阻与拉伸应变解析关系满足隧道效应理论。在循环载荷作用下，材料的电阻/应变响应体现出同步、灵敏、稳定的特性，证明该复合材料适用于大变形构建的应变监测与传感。

参考文献：

[1]　朱宏平，周方圆，袁涌. 建筑隔震结构研究进展与分析[C]//第 22 届全国结构工程学术会议论文集. 乌鲁木齐：中国力学学会，2013：159-168.

[2]　周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京：地震出版社，1997.

[3]　沈朝勇，谭平，崔杰，等. 超低硬度橡胶隔震支座水平力学性能相关性试验研究[J]. 地震工程与工程振动，2014，34（5）：204-216.

SHEN Chaoyong，TAN Ping，CUI Jie，et al. Experimental study on dependence of horizontal mechanical property of elastomeric isolators with ultra-low hardness[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics，2014，34（5）：204-216（in Chinese）.

[4]　石岩，王东升，孙治国，等. 隔震斜交连续梁桥地震反应及环境温度影响研究[J]. 振动与冲击，2014，33（14）：118-124.

SHI Yan，WANG Dongsheng，SUN Zhiguo，et al. Seismic response of isolated continuous skew bridge and the effect of ambient temperature on seismic behavior of bridge[J]. Journal of vibration and shock，2014，33（14）：118-124（in Chinese）.

[5]　朱宏平，沈文爱，雷鹰，等. 结构减隔震控制系统性能监测、评估与提升[C]//第 28 全国结构工程学术会议论文集. 南昌：中国力学学会，2019：135-148.

[6]　尹强. 非线性橡胶隔震结构参数识别与损伤诊断研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2010.

[7]　FENG Q，KONG Q Z，JIANG J，et al. Detection of interfacial debonding in a rubber-steel-layered structure using active sensing enabled by embedded piezoceramic transducers[J]. Sensors，2017，17（9）：2001.

[8]　SUN S L，MENG F R，CHANG W H，et al. A method for real-time measurement of seismic isolation rubber bearing based on embedded MEMS pressure sensors[C]//2019 International Conference on IC Design and Technology（ICICDT）. Piscataway，NJ，USA：IEEE，2019：1-3.

[9]　李宏男，高东伟，伊廷华. 土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J]. 力学进展，2008，38（2）：151-166.

LI Hongnan，GAO Dongwei，YI Tinghua. Advances in structural health monitoring systems in civil engineering[J]. Advances in me-

chanics,2008,38(2):151-166(in Chinese).

[10] 薛子凡,邢志国,王海斗,等.面向结构健康监测的压电传感器综述[J].材料导报,2017,31(17):122-132.
XUE Zifan,XING Zhiguo,WANG Haidou,et al. A review of piezoelectric sensors for structural health monitoring[J]. Materials review,2017,31(17):122-132(in Chinese).

[11] MARSDEN A J,PAPAGEORGIOU D G,VALLÉS C,et al. Electrical percolation in graphene-polymer composites[J]. 2D materials,2018,5(3):032003.

[12] DUAN L Y,FU S R,DENG H,et al. The resistivity-strain behavior of conductive polymer composites: Stability and sensitivity[J]. Journal of materials chemistry A,2014,2(40):17085-17098.

[13] AMBROSETTI G,GRIMALDI C,BALBERG I,et al. Solution of the tunneling-percolation problem in the nanocomposite regime[J]. Physical review B,2010,81(15):155434.

[14] BOLAND C S,KHAN U,BACKES C,et al. Sensitive,high-strain,high-rate bodily motion sensors based on graphene-rubber composites[J]. ACS nano,2014,8(9):8819-8830.

[15] HE Y,MING Y,LI W,et al. Highly stable and flexible pressure sensors with modified multi-walled carbon nanotube/polymer composites for human monitoring[J]. Sensors,2018,18(5):1338.

[16] AMJADI M,KYUNG K U,PARK I,et al. Stretchable,skin-mountable,and wearable strain sensors and their potential applications: A review[J]. Advanced functional materials,2016,26(11):1678-1698.

[17] MONTAZERIAN H,RASHIDI A,DALILI A,et al. Graphene-coated spandex sensors embedded into silicone sheath for composites health monitoring and wearable applications[J]. Small,2019,15(17):1804991.

[18] 葛怡,于晓灵,张艳丹,等.全氟辛基季胺碘化物改性碳纳米管对天然橡胶胶乳性能的影响[J].复合材料学报,2017,34(12):2841-2845.
GE Yi,YU Xiaoling,ZHANG Yandan,et al. Effect of trimethyl-1-propanaminium iodide modified carbon nanotube on properties of natural rubber latex[J]. Acta materiae compositae Sinica,2017,34(12):2841-2845(in Chinese).

[19] 宋君萍,李锡腾,田开艳,等.功能化碳纳米管/炭黑复合橡胶性能研究[J].高校化学工程学报,2019,33(5):1206-1212.
SONG Junping,LI Xiteng,TIAN Kaiyan,et al. Study on functionalized carbon nanotubes/carbon black rubber composites[J]. Journal of chemical engineering of Chinese universities,2019,33(5):1206-1212(in Chinese).

[20] STAUFFER D,AHARONY A. Introduction to percolation theory[M]. 2nd ed. London:Taylor & Francis,1994.

[21] YU J R,GROSSIORD N,KONING C E,et al. Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution[J]. Carbon,2007,45(3):618-623.

[22] HU N,MASUDA Z,YAN C,et al. The electrical properties of polymer nanocomposites with carbon nanotube fillers[J]. Nanotechnology,2008,19(21):215701.

[23] TRELOAR L R G. The physics of rubber elasticity[M]. 2nd ed. Oxford:Clarendon Press,1958.

[24] LAI X X,ZHOU X Y,ZHANG H L,et al. Toluene oxidation over monolithic $MnO_x/La\text{-}Al_2O_3$ catalyst prepared by a CTAB-assisted impregnation method[J]. Applied surface science,2020,526:146714.

[25] FLANDIN L,BRÉCHET Y,CAVAILLÉ J Y. Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors[J]. Composites science and technology,2001,61(6):895-901.

[26] LIN L,LIU S Y,ZHANG Q,et al. Towards tunable sensitivity of electrical property to strain for conductive polymer composites based on thermoplastic elastomer[J]. ACS applied materials & interfaces,2013,5(12):5815-5824.

(编辑 李坤璐)